

## 水は撥水面上をすべらないことを実証 ～流体の「すべり」現象を正確に捉える新規計測法～

### ポイント

- ① 水は撥水(はっすい)面(※1)上をすべると考えられていたが、これまでの実験結果は大きくばらついており、シミュレーション結果とも一致しなかった。
- ② 周波数変調型原子間力顕微鏡(FM-AFM)(※2)を基にして、水のすべりやすさを表す「すべり長さ(※3)」と表面構造を同時にマッピングできる新規手法を開発した。これによって、すべり長さを信頼性の高い物性値として取り扱えるようになった。
- ③ 水は撥水面上をすべらないというシミュレーションと良好に一致する結果が得られた。
- ④ 海水淡水化膜、冷却デバイス、環境発電装置などの表面設計への応用が期待できる。

### 概要

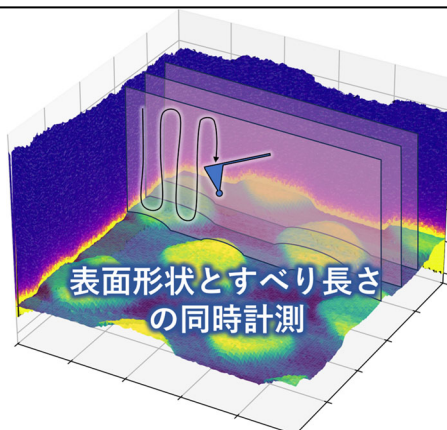
近年のナノテクノロジーの発展に伴い、固体面上で液体が水平方向に速度をもつ「すべり」現象が実験的に確認されつつあり、海水淡水化膜、冷却デバイス、環境発電装置など幅広い分野への応用が期待されています。これまで、濡れにくい撥水面では水がよくすべると考えられてきましたが、実験結果はばらつきが大きく、またシミュレーション結果とも一致していませんでした。そのため、「本当に水は撥水面をすべるのか？」というシンプルな問いに明確な答えが得られていませんでした。

今回、九州大学大学院工学府の石田遥也さん、同大学院工学研究院の手嶋秀彰准教授、高橋厚史教授とイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校の Vishwanath Ganesan 博士と Nenad Miljkovic 教授らの研究グループは、固体面の濡れやすさによらず、水はほとんどすべらないことを実験的に明らかにしました。

研究グループは、周波数変調型原子間力顕微鏡(FM-AFM)を用いて、水のすべりやすさを表す「すべり長さ」と固体面の微細構造を同時にナノメートル精度でマッピングできる新しい手法を開発し、既存手法の159倍の感度を実現しました。この方法でさまざまな固体面を調べた結果、水のすべり長さは濡れ性によらずほぼゼロであることが分かりました。一方、グラファイト(※4)のみ純水中に限って  $43.2 \pm 5.8$  ナノメートルの大きなすべりが見られましたが、電解質水溶液(※5)中ではそのすべりもほぼ消失しました。これらの実験結果はこれまでのシミュレーションによる報告と全て一致しており、本手法の計測精度の高さを裏付けています。

今回の成果は、これまでの実験で報告されてきた撥水面上の大きなすべりの原因が表面の微細な凹凸やナノバブル(※6)による「見かけのすべり」だった可能性を示すものです。固体と液体の摩擦を正しく理解する基盤となるだけでなく、今後の海水淡水化膜や環境発電などの表面設計を進めるための指針になることが期待されます。

本研究成果は国際学術誌「Nano Letters」に2026年5月15日(金)(日本時間)に掲載されました。



#### 研究者からひとこと：

本研究成果によって、すべり長さをこれまでにない正確さで測れるようになりました。今後はこの手法を、シミュレーションによる解析が難しい複雑な固液界面系に適用することで、まだまだ謎が多い流体力学の難問「すべり現象」を実験的に解明します。  
(手嶋秀彰)

## 【研究の背景と経緯】

古くから、固体面上では流体の水平方向速度がゼロになると考えられ、「すべり無し境界条件」として知られていました。しかしナノテクノロジーやシミュレーション技術の進歩によって、固体面上で流体が速度をもつ「すべり」現象が報告されるようになりました(図 1(a))。すべりやすい面ほど液体に働く摩擦が小さくなるため、海水淡水化膜、冷却デバイス、環境発電装置など、さまざまな技術の性能向上が期待できます。したがって、本当に液体はすべるのか、どのような表面ならすべりやすくなるのかは、基礎科学と応用の両方にとって重要な課題でした。

これまで、濡れにくい撥水面上では水がすべりやすくなるという考えが広く受け入れられていました。しかし実際には、過去の実験で報告された撥水面上のすべりやすさは大きくばらついていました(図 1(b))。一方、計算機シミュレーションでは、表面の濡れやすさによらず水のすべりはごくわずかと予測されています。この実験とシミュレーションの相違は、長らく未解明のままでした。

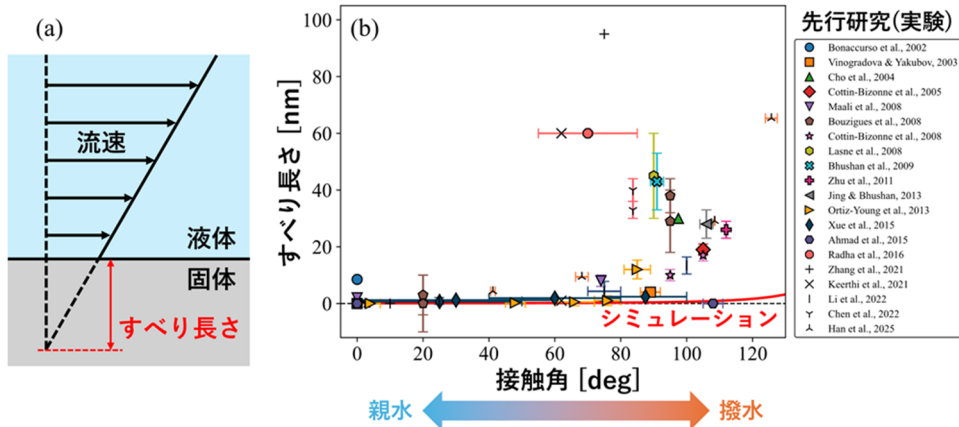


図 1 (a)すべりが生じているときの固体ごく近傍の液体の流速分布。すべり長さは、固体内部まで延長した流速が 0 になる点と固体表面間の距離と定義される。(b)これまでに報告された固体-水界面のすべり長さの実験データを、接触角に対して整理した結果。赤線はシミュレーションの傾向を示す。

この相違の大きな原因として考えられてきたのが、ごく小さな凹凸やナノバブルといった微細な表面構造です。こうした構造があると、水が本当にすべっているわけではなくても、測定上はすべっているように見えることがあります。ところが従来の方法では、水のすべりやすさと表面の微細構造を同時に調べるのが難しく、真のすべりと見かけのすべりを区別できませんでした。

## 【研究の内容と成果】

本研究では、周波数変調型原子間力顕微鏡(FM-AFM)と呼ばれる装置を用いることで、水のすべりやすさを表す「すべり長さ」の計測感度を従来の 159 倍高めることに成功しました。また、これまでより小型の探針を使うことで、ナノスケールの表面構造とすべり長さを同時にマッピングできるようになりました(図 2(a, b))、表面構造やナノバブルがあるとすべり長さが過大に見積もられてしまうことを実証できました。さらに親水から撥水まで、さまざまな平坦表面上のすべり長さを系統的に調べたところ、ほぼ全ての表面でゼロになりました。これは「撥水面ほど水が良くすべる」という単純な関係は成り立たないことを意味しています。一方でグラファイト上のみ  $43.2 \pm 5.8$  ナノメートルのすべり長さが得られましたが、水に塩化カリウムを添加した電解質水溶液中ではゼロになりました。この特異なすべり現象はシミュレーションで以前から予測されていましたが、それを世界で初めて実験により証明しました。

本研究は、長年続いてきた「本当に水は撥水面をすべるのか？」という論争に対し、実験による信頼性の高い答えを与えるものです。今回の成果により水のすべりは単に濡れやすさで決まるのではなく、固体面の原子スケールの構造や液体の組成・電解質条件に強く左右されることが明確になりました。

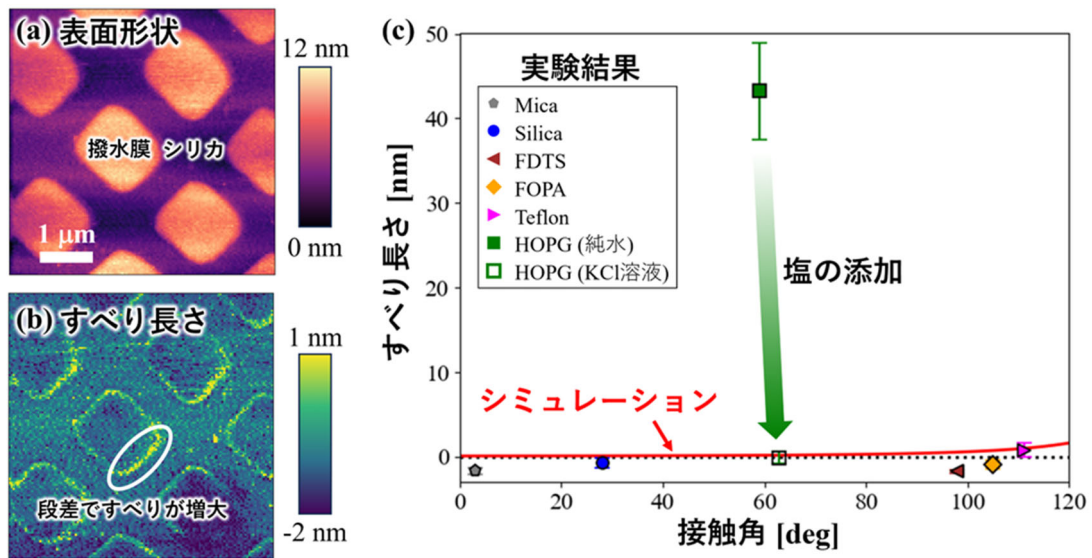


図 2 FM-AFM で取得したシリカ-撥水膜複合表面の(a)形状像と(b)すべり長さマップ。(c)接触角 3°~111°のナノスケールで平坦な基板において計測したすべり長さの比較。

### 【今後の展開】

これまでは計測精度の低さゆえに、すべり長さは信頼性の低い値でしたが、今回の研究で確立した手法によってすべり長さを物性値として取り扱うことが可能となります。また本手法は水のすべり計測に留まらず、塩を含む電解質溶液や冷媒、イオン液体、あるいは帯電表面やポリマー、低次元材料など、シミュレーションでは模擬が難しいさまざまな液体・固体界面におけるすべり現象を実験で先駆けて研究する有用なツールになると考えられます。得られる知見は、海水淡水化膜、冷却デバイス、環境発電装置といった広い分野における表面設計への応用が期待できます。

### 【用語解説】

#### (※1) 撥水面

・・・水を弾きやすい表面のこと。一般に、水滴を置いた際の気液界面と固液界面との成す角(接触角)が 90°より大きい面を指し、逆に 90°より小さければ親水面と呼びます。

#### (※2) 周波数変調型原子間力顕微鏡(FM-AFM)

・・・AFM は非常に細い探針を使って、表面形状や表面近くで働く力を測る装置。FM と呼ばれるモードは非常に高感度であり、微小な力も精度良く計測できます。

#### (※3) すべり長さ

・・・液体が固体表面でどれだけすべりやすいかを表す指標。値が大きいほど、表面との摩擦が小さく流体がよくすべることを意味します。

#### (※4) グラファイト

・・・炭素原子がハニカム状に規則正しく並んだ材料。今回の研究では、他の材料には見られない比較的大きなすべりが純水中で確認されました。

#### (※5) 電解質水溶液

・・・塩などが溶けてイオンを含む水溶液のこと。今回の研究では、電解質水溶液中ではグラファイト表面での水のすべりがほぼ無くなることが分かりました。

#### (※6) ナノバブル

・・・表面や液体中に存在する極めて小さな気泡。固体面上にナノバブルがあると、すべり長さを過大に見積もってしまう原因になることがあります。

### 【謝辞】

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 さきがけ（JPMJPR2308）、日本学術振興会（JSPS） 科研費（JP22KK0249, JP24K00822, JP24H00293, JP25K22071, JP25KJ1967）、および公益財団法人 ENEOS 東燃ゼネラル研究奨励・奨学会の助成を受けたものです。

### 【論文情報】

掲載誌：Nano Letters

タイトル：Hydrophobicity Does Not Affect Water Slip: Insights from Slip Length Mapping

著者名：Haruya Ishida<sup>1</sup>, Koji Takahashi<sup>1</sup>, Vishwanath Ganesan<sup>2</sup>, Nenad Miljkovic<sup>2</sup>, Hideaki Teshima<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 九州大学, <sup>2</sup> イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校)

DOI：10.1021/acs.nanolett.6c01403

### 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院工学研究院航空宇宙工学部門

准教授 手嶋 秀彰（テシマ ヒデアキ）

TEL：092-802-3050 FAX：092-802-3017

Mail：hteshima05@aero.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL：03-5214-8404 FAX：03-5214-8432

Mail：jstkoho@jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔（アンドウ ユウスケ）

TEL：03-3512-3526 FAX：03-3222-2066

Mail：presto@jst.go.jp